

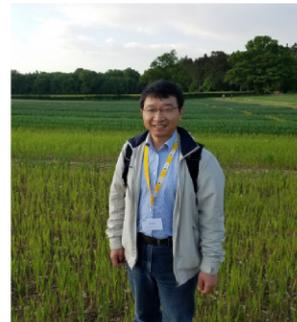
# 黄土高原沟壑区综合治理试验示范成果评述与 高质量发展研究展望

——以陕西省长武县王东沟小流域30 a多治理实践为例

郭胜利<sup>1,2</sup>, 姬洪飞<sup>1,2</sup>, 郝明德<sup>1,2</sup>, 高长青<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省长武县旱作小麦育种试验中心, 陕西 长武 713600)

**摘要:** [目的] 研究黄土高原沟壑区典型小流域综合治理的成效以及生态文明建设时期面临的问题, 旨在为该区域高质量发展提供理论支持和实践经验。[方法] 以陕西省长武县王东沟小流域综合治理试验示范研究实践为例, 基于1986年以来的监测和研究资料, 总结分析了该流域30 a多来不同时段在生态环境、土地生产力和农民经济收入等方面的变化。[结果] 王东沟小流域综合治理过程存在明显的阶段性。① 综合治理阶段(1986—1995)。以提高土地生产力为突破口, 重点提高粮食产量和人均经济收入。同时从塬面到沟道综合整治水土流失, 合理开发利用土地。② 生态保护阶段(1996—2005)。更新与升级粮果管理措施, 保护和改善生态环境, 进一步稳定和提高了土地生产力。③ 高质量发展试验示范研究阶段(2006—2019)。以王东沟小流域为试点, 从发展绿色高效技术的角度进行研究和示范, 探索适合小流域内涵式高质量绿色发展的技术体系, 为黄土高原沟壑区的高质量发展奠定基础。[结论] 为实现黄土高原沟壑区的高质量发展, 必须在生态文明理念指引下, 重点研究流域生态管理和技术创新体制和机制建设, 在总体控制水土流失基础上, 保障人居环境的生态性, 社会经济系统发展的可持续性以及流域生态系统结构和功能的和谐与完整性。



**关键词:** 黄土高原沟壑区; 水土流失; 小流域综合治理; 高质量发展; 生态文明; 王东沟小流域

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2020)01-0318-07

中图分类号: S157, X321

**文献参数:** 郭胜利, 姬洪飞, 郝明德, 等. 黄土高原沟壑区综合治理试验示范成果评述与高质量发展研究展望[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 318-324. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.046; Guo Shengli, Ji Hongfei, Hao Mingde, et al. A review on experiment and demonstration effects of comprehensive management and research perspectives on regional high-quality development in highland region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 318-324.

## A Review on Experiment and Demonstration Effects of Comprehensive Management and Research Perspectives on Regional High-quality

### Development in Highland Region of Loess Plateau

—A Case Study on Management Practices for More than 30 Years at Wangdonggou Small Watershed, Changwu County, Shaanxi Province

Guo Shengli<sup>1,2</sup>, Ji Hongfei<sup>1,2</sup>, Hao Mingde<sup>1,2</sup>, Gao Changqing<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Dryland Wheat Breeding Center of Changwu County, Shaanxi Province, Changwu, Shaanxi 713600, China)

**Abstract:** [Objective] The achievements of the comprehensive management and current issues of small watersheds in the highland region of Loess Plateau were evaluated in order to provide a theoretical basis and

收稿日期: 2019-08-28

修回日期: 2019-12-31

资助项目: 国家重点研发计划项目“褐土区氮磷淋溶的阻控机制与措施研究”(2016YFD0800105)

第一作者: 郭胜利(1969—), 男(汉族), 河北省栾城县人, 博士, 研究员, 主要从事流域生态与管理等研究。Email: slguo@ms.iswc.ac.cn.

practical evidence for high-quality development during the new era of ecological civilization. [Methods] With Wangdonggou small watershed in Changwu County, Shaanxi Province as a study area, the changes in ecological, land productivity, and economic aspects using monitoring data since 1986 at the small watershed, and research findings at different phase during 30-years in the highland region were summarized and analyzed. [Results] There were significantly periodic and phrasal changes of the small watershed during the comprehensive management process. ① Comprehensive management phase(1986—1995): Taking enhancing land productivity as a breakthrough, it was emphasized to increase food production and per capita income. Simultaneously, the comprehensive management of soil and water loss was carried out from tablelands to gullies, and the land was exploited rationally. ② Ecological protection phase(1996—2005): The management of food production and apple industry was updated and upgraded. The ecological environment were protected and improved, then land productivity at the small watershed were further stabilized and improved. ③ High quality development demonstration phase(2006—2019): Wangdonggou watershed was took as a pilot project with studying and demonstrating from the perspective of the development of green and efficient technologies, to explore the technology system suitable for the concentric and high-quality green development of small watershed, thus laying a foundation for the high-quality development of the highland region. [Conclusions] Guided by the concept of ecological civilization, ecological management of watershed and development of technological innovation system must be addressed to realize high-quality development in the region. The ecological quality of human settlements, socio-economic sustainable development, and the harmony and integrity of watershed structures and functions must be considered on the basis of soil and water loss regulation of the highland region of Loess Plateau.

**Keywords:** the highland region of Loess Plateau; soil and water loss; comprehensive management of small watershed; high-quality development; ecological civilization; Wangdonggou small watershed

黄土高原沟壑区地处黄土高原南部,是黄土高原—川滇生态屏障的重要组成部分,对全国生态屏障的建设起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。该区域历史积淀深厚,中华文明和中华农耕文化源远流长。后稷的曾孙公刘在此“教民稼穡”,开启了华夏农耕文化之先河<sup>[2]</sup>。该区域既是晋、陕、甘三省粮食生产基地,又是全国优质苹果的适生区。但是,在甘肃省庆阳市等部分区域由于沟头溯源侵蚀蚕食塬面,加剧流域产沙输沙强度,损毁基础设施,严重影响了农业生产的持续发展。因此,在该区开展水土流失治理不仅是促进黄土高原沟壑区农业生产、适宜生存、绿色生态发展的重要内容,也是保障国家生态安全、社会稳定和区域高质量发展的重要措施。

20 世纪 80 年代以来,伴随着农村各项改革措施深入实施,尤其联产承包责任制的实施,黄土高原沟壑区的水土流失治理进入了以小流域综合治理为基本单元,治理与开发并举的新阶段。30 a 多来,经过国家和省部级科技攻关项目的持续支持,黄土高原地区的社会、经济和生态状况发生显著改善,成功地解决了区域内人民群众的口粮问题,遏制了严重水土流失等环境问题。中国共产党第十九次代表大会以来,随着中国特色社会主义进入新时代,开展生态文明建设,维持人与自然和谐共存成为新时代的主旋律。在新的形势下,如何实现流域高质量发展成为当前亟待解决的理论与现实问题。

黄土高原综合治理是一项世纪性工程<sup>[3-4]</sup>。本文以黄土高原沟壑区的典型区域王东沟小流域为例,基于 1986 年以来的长期监测和研究资料,分析该流域生态与经济发展不同阶段的主要任务及治理成果,研究黄土高原沟壑区小流域综合治理的成效以及生态文明建设时期面临的问题,旨在为该区域高质量发展提供理论支持和实践经验。

## 1 研究区概况

黄土高原沟壑区位于崂山—白于山一线以南,关中盆地以北,汾河以西,六盘山以东。该区涉及甘肃省、陕西省和山西省共 7 个市的 34 个县(区),区域总面积约  $5.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2015 年区域总人口数量为  $8.15 \times 10^6$  人,农业人口数量  $5.97 \times 10^6$  人。该区 2015 年国内生产总值  $2.09 \times 10^9$  元,粮食总产量  $3.56 \times 10^6 \text{ t}$ ,农业人均纯收入 8 433 元/a。区域山地占 45.05%,黄土塬占 50.57%,其他类型地貌占 4.38%,海拔 1 000~2 000 m,平均海拔 1 200 m,主要涉及泾河、北洛河、昕水河等流域<sup>[5]</sup>。气候属于中温带半湿润区,多年平均气温  $8.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,多年平均风速  $1.4 \sim 4.3 \text{ m/s}$ ,多年平均降水量 460~667 mm。该区土壤类型以黄绵土、黑垆土和褐土为主,植被类型主要为温带落叶阔叶林,2015 年林草覆盖率 56.17%。区域内 2015 年水土流失面积  $2.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占区域总面积的 38.17%,区域内以沟蚀为主,塬边沟壁崩塌、滑塌、泻

溜等重力侵蚀活跃。

1984年,中国科学院水利部水土保持研究所按照国家重点科技项目(黄土高原综合治理)的总体部署,选取了位于黄土高原沟壑区的陕西省和甘肃省交界的长武县王东沟小流域(东经 $107^{\circ}40'30''$ — $107^{\circ}42'30''$ 北纬 $35^{\circ}12'$ — $35^{\circ}16'$ )作为试验示范区(2005年科技部建立“陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站”;2019年农业农村部又在此建立“国家农业环境长武观测实验站”),从资源、环境、经济、社会多方面进行综合研究。王东沟小流域所在的陕西省长武县是黄河中游100个水土流失重点县之一。王东沟小流域总土地面积 $8.3\text{ km}^2$ ,地貌分为塬面和沟壑两大单元,为高原沟壑区的典型代表。从生产利用角度可将该地区的地貌分为塬、梁、沟三大类型,各类型面积均占约 $1/3$ 。流域内地带性土壤属于黏黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土。梁顶和梁坡是黄壤土,无明显剖面发育。流域所在地区属于暖温带半湿润大陆季风气候,年均气温 $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,塬面全年 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温是 $3\ 688\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温是 $3\ 029\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期为171 d。热量供作物一年一熟有余。地下水埋深 $60\sim 80\text{ m}$ 。溯源侵蚀、坡面侵蚀与重力侵蚀并存,土壤侵蚀模数达 $1\ 860\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。沟壑密度 $2.78\text{ 条}/\text{km}^2$ ,主沟道平均比降 $5.47\%$ 。塬面最高点海拔 $1\ 226\text{ m}$ ,沟口最低点 $946\text{ m}$ ,高程差 $280\text{ m}$ <sup>[6]</sup>。

王东沟小流域是典型的以农为本的传统农业区,治理之初,该流域生产用地面积占流域总面积的 $54\%$ ,尚有约 $1/3$ 面积的生产可利用地未得到利用。综合治理前粮食产量仅有 $2\ 700\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,农田水分、养分循环强度低,无机氮磷的投入总量不过 $67.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,沟坡梯田投入更低( $22.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ )<sup>[7]</sup>。当地农民只重视农田特别是塬面农田,忽视沟坡土地。王东沟小流域1985年底总人口 $1\ 778$ 人,人口密度 $224\text{ 人}/\text{km}^2$ ,人均土地面积 $0.45\text{ hm}^2$ 。1986年建立试验示范区时,总收入组成中,种植业与工副业是两个主要部分,合计比例高达 $85\%$ ;纯收入中两者合计达 $91.3\%$ ,种植业占 $50.1\%$ ,工副业占 $41.2\%$ ,而果、林、牧三者相加不足 $10\%$ ,人均收入 $230$ 元。人—地—粮矛盾十分突出,当地农民的生活状况处于基本温饱水平,并不富裕,缺乏改善经营和扩大生产的技术和资金。

## 2 王东沟小流域综合治理发展阶段及其成效

### 2.1 综合治理阶段(1986—1995)

该阶段的治理目标是:以提高土地生产力为突破口,重点提高粮食产量和人均经济收入,同时治理水土流失,合理开发利用土地。

(1) 增加物质投入,大幅度提高粮食生产力<sup>[3,8-9]</sup>。①增加化肥使用量。王东沟小流域土壤贫瘠,流域治理初期,在坚持重视农家肥基础上,化肥施用量由 $64.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ 增加到 $157.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,提高幅度达 $144\%$ 。进而依据水分供应,改善氮磷化肥的投入比例。丰水年份在保证磷肥用量的前提下,增大氮肥用量;常态年份氮磷化肥皆采取最佳施用量;干旱年份保证磷肥的投入。②通过品种改良优化作物品种结构。该区主要粮食作物是冬小麦和春玉米。小麦品种由早期的702,改良到旱肥高产长武131,89-134。玉米品种以丹玉131为主。通过增加肥料投入和改良作物品种措施,大幅度提高了土地生产力,改善了粮食生产的低产状况。从而使得王东沟小流域粮食产量由治理之初的 $2\ 478\text{ kg}/\text{hm}^2$ ,增加到 $3\ 755\text{ kg}/\text{hm}^2$ (表1)。

(2) 培育和发展果业,增加农民经济收入<sup>[9]</sup>。由于王东沟小流域所在的渭北旱塬是中国乃至世界的优质苹果生产基地,所以在提高粮食产量的同时,应积极引导当地群众种植果树,拓展当地群众的经济收入渠道。1986年,王东沟小流域在占土地面积 $75\%$ 的荒芜低产沟壑山坡上修整梯田,建立苹果种植区。90年代初,苹果园产值已达到 $7.00\times 10^4\text{ 元}/\text{hm}^2$ 。1986—1995年,王东沟小流域果业的比例由治理前的不到 $2\%$ 发展到 $40\%$ 以上(表1)。其次,引进推广富士苹果替代秦冠、黄元帅等苹果品种。在此基础上,实施优果工程(如果实套袋技术),氮磷钾配施技术,采用改良疏层型、细长纺锤型等改型修剪技术,配合果品专用生物钙肥,果园覆盖技术,改善水分条件等。通过上述技术和措施的实施,有力地促进了王东沟小流域果业生产从产量型向产量、质量型的转变。苹果产业成为当地群众经济收入的重要支柱,显著增加农民经济收入。

(3) 沟坡地合理开发利用,控制水土流失<sup>[3,9]</sup>。在解决当地群众口粮问题的同时,开展大规模退耕还林还草,实施土地利用结构调整,控制水土流失。王东沟沟坡地占流域总面积的 $65\%$ ,因水土流失严重,土壤贫瘠,交通不便等原因大面积荒芜或广种薄收。塬面农田生产力的大幅度提高,为坡耕地退耕或荒坡地的治理奠定了基础。通过与生物工程防蚀措施结合,实施沟坡道路防蚀;通过沟坡地带梯田化,陡坡地种植水保防护林,防治坡地水土流失。沟谷地带进行柳谷坊等建设,控制沟道泥沙不出沟。上述治理措施在流域不同部位的实施,不仅降低了流域的输沙量,土壤侵蚀模数也降至 $800\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ (表1)。该阶段整个流域土地利用结构也发生显著变化,粮、果园、林地、草地的面积由治理前的 $50\%$ , $2.1\%$ , $19.4\%$ 和 $12.9\%$ 变化为 $28\%$ , $13.5\%$ , $28\%$ 和 $12.5\%$ 。

表 1 综合治理期间王东沟小流域社会经济生态指标的变化

年份	粮食产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	土地利用结构/%				人均 收入/元	产业结构/%			流域输沙量/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤 有机质/%	土壤有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—3 m 土层 硝态氮/(kg·hm <sup>-2</sup> )
		粮田	果园	林地	草地		种植业	果业	工副业				
1981—1985	2 478	50	2.1	19.4	12.9	230	55.6	1.5	42.9	1 860	1.1(0.36~2.10)	4.5(1.3~9.6)	—
1986—1990	3 999	31	8.5	26.1	13.5	508	61.8	6.0	32.3	—	—	—	—
1990—1995	3 755	28.0	13.5	28.0	12.5	1 313	23.9	40.7	35.3	—	—	5.2(1.0~25.3)	160
1996—2000	4 560	—	—	—	—	2 513	14.2	34.2	51.6	—	—	—	1 400
2001—2005	5 165	18.0	26.0	30.0	11.0	3 595	9.1	43.6	39.6	895	1.33(0.47~2.75)	17.2(1~85.4)	3 032
2006—2010	5 525	—	—	—	—	5 300	—	—	—	—	—	—	—
2011—2015	5 350	10.0	35.0	31.0	12.0	11 000	5.0	55.0	40.0	<500	—	30.0(1~120)	5 532

注:资料来源:①长武试验站“九五”课题研究报告《高原沟壑区高产、高效农业持续发展研究》;②长武试验站“十五”课题研究报告《黄土高原南部沟壑区抗逆减灾农业发展模式与技术研究》。

## 2.2 生态保护阶段(1996—2005)

该阶段的治理目标是:从塬面到沟道综合整治水土流失,更新与升级粮果管理措施,保护和改善生态环境,进一步稳定和提高了土地的生产力。

(1)小流域生态质量明显改善<sup>[9-10]</sup>。随着流域水土流失的控制,流域土壤侵蚀模数多年稳定在 450 t/(km<sup>2</sup>·a)以下<sup>[11-12]</sup>。流域的土壤碳汇功能得到加强,土壤的碳氮磷含量显著提高,土壤质量和功能也逐步得到改善。相关监测数据显示,与 1993 年相比,2004 年流域农田、果园、林地、草地 0—20 cm 土层有机碳密度分别提高了 30%,38%,33%和 73%。提高土地生产力,采取保护性耕作和加强林草地的抚育管理是实现这一阶段流域土壤固碳潜力的重要措施。

(2)农田管理措施的更新与升级。20 世纪 90 年代中期以来,大面积实施高产抗逆的作物新品种、量水施肥技术和以覆盖为主的农田水分管理等措施,从水热两方面改善了农田生态条件,进一步稳定和提高了土地的生产力。其次,系统研究旱作覆膜作物养分需求规律、根层氮素监控与管理、根系—水分利用—根层养分调控关系,在此基础上,拓展了以肥促根,以根提水,水肥协同,减施增效的途径,构建耦合光热资源—作物群体—土壤水肥资源的氮肥减施增效技术体系。

(3)进一步推广优果工程<sup>[11]</sup>,促进果业生产的产业化。果品储藏有了较大发展,销售渠道畅通,初步建成苹果产、贮、销一条龙产业化链条。基于水分资源的限制,为保障果业的持续发展,在栽培管理角度采取了以下措施:①由乔化栽培转向矮化栽培;②地面管理由原来清耕转为人工生草或自然生草<sup>[13-14]</sup>;③修剪方式由原来的轻剪长放改为更新、量化修剪,降低果园水分消耗,维持生殖生长与营养生长之间的平衡。

## 2.3 区域高质量发展试验示范研究阶段(2006—2019)

该阶段的示范研究任务是:以王东沟小流域为试点,从发展绿色高效技术的角度进行研究和示范,探

索适合小流域内涵式高质量绿色发展的技术体系,为黄土高原沟壑区的高质量发展奠定基础。

(1)以水分承载力为中心的粮果与生态产业技术研究。土壤水是粮田和果园生产力与生态恢复的重要资源,土壤水调控技术和措施的研究对该区生态文明建设具有重要影响。改变水资源消耗型的果业发展模式,基于降水资源的可持续利用,建设绿色高效果园生态经济。具体而言,一方面引进低耗水的矮化型苹果树品种,另一方面合理布局果园的种植密度;同时栽培技术上实行降低水分消耗的管理技术。例如,果园量化修剪、天然生草等技术既可以改善产量,提高土壤有机碳又可以降低对水分的消耗。在种植布局上,构建粮食和果园复合种植系统,果树的深层耗水和粮食作物浅层耗水协调起来。在王东沟小流域,当地果农通过老果园的退果还耕,类似粮食作物的轮作,从而使土壤深层水分在一定时期内得到恢复。

(2)以化肥投入零增长为切入点的粮果生态系统绿色施肥技术研究。30 a 多来王东沟小流域果品和粮食生产的提高依靠化肥的大量投入(果园化肥投入 6~7 t/hm<sup>2</sup>,折合 NPK 大致为 1 t/hm<sup>2</sup>)。通过大量化肥投入提高苹果和粮食产量,弥补耕地资源的不足,导致化肥利用率低,营养元素随水分淋溶下渗在土壤深层累积,或随径流迁移进入地下水源和河流,对土壤环境质量带来潜在危害。在稳定粮食生产的基础上,以特色果业发展为中心,依靠科技力量,改变以往主要靠化肥投入维持果园产量的经营方式。提高粮果与豆科作物轮作/套种,增加生物固氮,降低对化肥的依赖。其次,探索通过微生物固氮释放磷素,大幅度降低化肥投入,降低对资源投入的依赖和土壤中氮磷的积累,以减少流域面源污染,保护生态环境。同时在保证粮果产量的基础上,研发和推广降低温室气体排放的粮果生产技术。

(3)提高果园生态服务功能多元化的技术集成研究。近年来,人们多以提高果园的产量,追求最大的经济效益为主要目的。随着市场的竞争、黄土区果

业链的形成和完善,在高塬沟壑区如何围绕果园生态系统,发展其果园服务功能多样化也是当前果园升级所面临的问题。在果园的开花期和鲜果成熟期,开展赏花、采摘功能生态旅游;其次,通过增加果园的附加值,实现果园产值的提升。例如,在果园中增加畜禽养殖一方面可以降低化肥和有机肥的投入,另一方面有利于消灭害虫,同时发展绿色养殖产业。利用果园修剪的枝条开展蘑菇的栽培,培育新型产业。同时借助互联网和物流网,开展苹果的田间管理和销售等技术服务。

(4) 重力侵蚀防治和固沟保塬技术措施体系研究。高塬沟壑区沟头溯源侵蚀的因素为自然和人为因素两类<sup>[15]</sup>。在气候变化的背景下,极端性降水增多,塬面村庄硬化地面产流加剧的条件下,这一危害有加趋势。塬面的综合治理可以利用“拦、蓄、排、引”等措施。当塬面措施不足以切断径流,阻止径流达到沟底时,应同时修筑沟底谷坊,抬高侵蚀基准面,防止沟床下切。但目前关于该区这一领域的相关研究和理论还十分薄弱,有效的治理模式尚有待进一步验证。2015年以来,我们在王东沟流域开展了水分—土壤—大气—生物系统的综合大型科研平台建设。并专门设立了重力侵蚀定位监测场,利用多种新兴技术(无人机技术、激光等),通过多学科协作研究重力侵蚀的变化规律,为固沟保塬提供技术支撑。

同处黄土高塬沟壑区的陕西省淳化县泥河沟小流域<sup>[16]</sup>、甘肃省庆阳市的南小河流域<sup>[17]</sup>的综合治理也经历了相似的发展过程。这两个流域在综合治理初期,通过沟坡造林、修筑梯田等生物和工程措施控制水土流失、改善生态环境。第二阶段在此基础上,大力推行深耕、推广良种、配方施肥、覆膜等综合措施提高旱作农业土地生产力。第三阶段从流域自然资源的特点出发,大力发展林果业和畜牧业,不断调整和优化产业结构,发展农业商品经济。

### 3 黄土高塬沟壑区近年来出现的新问题

由于长期以来各种复杂因素的影响,新时期黄土高塬沟壑区在发展过程中也出现了一些新的问题,这些问题将严重制约该区的进一步发展。以王东沟小流域为例,虽然经过 30 a 多的综合治理,但是随着社会经济的发展和治理措施的加强等因素的影响,近年来出现了一些新的问题。类似的问题在黄土高原沟壑区其他流域也都有一定表现<sup>[16-21]</sup>,值得高度重视。

(1) 土壤干层的形成对果园生态系统可持续性带来威胁。黄土高塬沟壑区为国家商品化苹果生产基地,果园的高入渗特性、低产流率和强烈的蒸腾耗

水作用所形成的土壤干层,苹果种植面积扩大甚至覆盖整个塬面将不可避免地改变区域水循环方式,增强土壤—植物—大气间垂直水分交换,削弱降雨转化为地表径流和地下水的比例,从而最终影响区域人、畜、工、矿所赖以生存的地表水资源和地下水资源的数量,这一水文生态环境现象应该引起高度重视<sup>[18-20]</sup>。降水偏少且分布不均,水分不足是制约该区域果园生产力的重要因素。20 世纪 80 年代建立的果园,其产量均呈现出先逐年升高达到最大值,之后随当地降雨量变化而波动性降低趋势,1~20 a 生果园平均年耗水量均高于同期年降水量,导致果园深层土壤干燥化强烈<sup>[20-21]</sup>。20 世纪 90 年代初期王东沟小流域开始大规模果园种植,至今大部分果园已栽植 20 a 余以上,其深层土壤干燥化现象明显<sup>[22-23]</sup>。氢氧同位素技术测定结果表明,苹果树耗水深度可达 25 m,栽植 17 a 的苹果树会利用土壤中几十年的老水<sup>[22]</sup>。土壤干层的形成使得土壤水库调节能力下降甚至消失,缩短了果园的生长年限<sup>[24-25]</sup>。

(2) 硝态氮的深层积累对地下水的污染造成潜在威胁。氮肥的投入是支撑这一地区粮食和苹果持续高产的重要驱动力,但由于化肥利用率低,氮残留量高<sup>[26-28]</sup>。2017 年 10 月,土壤剖面硝态氮含量监测结果显示,果园土壤 0—400 cm 剖面中,在 80—100 cm 层出现硝态氮累积峰,在 380—400 cm 也发现有高浓度硝态氮。在大于 20 a 的老果园,8 m 深的剖面中已经发现硝态氮的积累峰值。不同利用年限的果园中,剖面土壤中的硝态氮积累峰值逐渐下移。关中盆地的监测数据显示,由于土壤硝态氮积累显著,部分地区地下水中氮素含量已经超过饮用水标准。在极端降水增加的趋势下,氮的残留和积累不仅影响粮果生态系统持续发展,且对区域地下水的危害带来潜在威胁。

(3) 磷肥的残留积累带来面源污染的潜在威胁。20 世纪 80 年代初,黄土区土壤有效磷含量属于缺乏的水平<sup>[29]</sup>。但是,由于持续大量的磷肥投入,王东沟小流域已有 70% 果园土壤 Olsen-P 含量超过 15 mg/kg,部分果园土壤 Olsen-P 含量甚至超过了 100 mg/kg<sup>[30]</sup>。与 1993 年大规模建立果园时相比,2004 年果园土壤全磷每年提高 20~30 mg P/kg, Olsen-P 含量每年提高 3~4 mg/kg。20—60 cm 土层的果园全磷和有效磷含量也逐渐提高<sup>[30]</sup>。在高磷含量果园中,土壤 20—60 cm 土层中 Olsen-P 含量相对提高。土壤磷素的最高吸附量则从不施肥土壤的 909 mg/kg 降低到 500 mg/kg,降低了 45.0%;饱和吸附度值由 1.0% 增加至 8.3%,升高了约 8.3 倍;提高了潜在的淋失风险<sup>[31]</sup>。更令人担忧的是,王东沟小流域 2018

年监测资料显示,沟道泥沙 Olsen-P 含量升高到 20 mg/kg,而 2008 年沟道中土壤 Olsen-P 含量低于 5 mg/kg。这一结果显示了塬面或坡地农田生态系统中,土壤磷素随着径流和泥沙迁移到了沟道。

(4) 塬面的硬地面产流加剧了对塬面蚕食。20 世纪 80 年代初期,水土流失治理以“坡沟兼治,治坡为主”<sup>[3]</sup>。随着社会经济的发展,流域内村落建设不断改善,流域村庄院落的庭院经济逐步被硬化后的地面和观赏性植物所代替,原来的土路全部改造成了水泥路,村庄内的部分生态绿地被硬化,造成集雨面积和地表径流量的急剧增大。在极端降水增加的背景下,塬面硬地面产流加剧趋势明显。在 30 a 多综合治理过程中,沟道的重力侵蚀治理相对薄弱。嵌入塬面的侵蚀沟系统综合治理和塬面径流疏导相对薄弱。塬边支毛沟在频繁的塬面来水冲刷下,沟头不断前进,沟道变宽变深,塬面逐年萎缩,成为黄土塬区经济社会发展和生态屏障建设的突出制约因素。

(5) 农村劳动力转移和土地流转问题,导致土地粗放经营或荒芜。自上 20 世纪 80 年代以来,随着我国工业化和城镇化的快速发展和综合国力的不断增强,黄土区的农村劳动力转移十分显著。在上 20 世纪 80 年代初期,王东沟小流域内劳力人口为 588 人,其中以 30~40 岁壮年占主体。目前在农村从事粮食种植和果业生产的劳力人口锐减为 300 多人,且主要是 55 岁以上人员。黄土区农村劳动力转移致使农地利用呈现粗放经营的趋势,耕地利用水平不断降低。在王东沟小流域塬面的上等农田和果园甚至出现了荒芜局面。

#### 4 黄土高原沟壑区高质量发展研究展望

生态系统是人与自然相互依存,相互影响的有机整体,维持人与自然和谐健康发展的基本导向是以人的福祉为目标。中国共产党第十九次代表大会以来,生态文明建设成为新时代的主旋律。国家关于黄河流域生态保护和高质量发展战略的实施为推动黄土高原沟壑区生态环境保护和综合治理工作带来了难得的发展机遇。

在未来 10 a 左右的时间里,黄土高原沟壑区的治理研究,必须在生态文明理念指引下,基于区域自然资源的承载力,通过流域生态管理和技术创新,确保黄土丘陵沟壑区生态环境与人类社会和谐发展,共同繁荣。

(1) 突破治理开发的传统思维,树立生态适应型的发展思路。传统的高原沟壑区治理开发利用模式以利用为目的,治理以功利性为导向,不仅存在投入

大,稳定性差等问题,而且治理开发集中于能迅速产生效益的领域或地形地貌上。高原沟壑区地形地貌破碎,土地利用方式多样,生态系统类型复杂。该区域主要治理目标应该是全面控制水土流失,保护生态环境,保障人居环境的生态性,社会经济系统发展的可持续性以及流域生态系统结构和功能的和谐和完整性。要针对这一区域资源环境禀赋,建立不同适应性的生态系统,从而实现区域整体生态服务功能的最大化。①在塬面建设区域性商品粮基地,同时发展优质果业(包括果品加工业)等多种特色优势产业,构建精致宜人的人居环境;②在沟坡上构建林、果、草镶嵌的土地利用和生态保护格局,适度发展畜牧业等产业;③沟道则以生态林草为主要土地利用方式,依托淤地坝发展设施蔬菜等高产值产业。

(2) 充分利用自动化、大数据等先进工业技术促进区域生态保护和高质量发展。基于王东沟小流域等已有的流域综合治理成果和经验,依托现代信息技术、网络空间技术、先进的田间监测技术(降水自动监测、土壤水分自动实时监测技术、径流泥沙的自动监测技术等),开展流域智能化高标准信息获取。依托现有资源加强数字流域和智慧流域建设,加快物联网、大数据、区块链、人工智能、第五代移动通信网络等现代信息技术在水土流失综合治理和粮果生产中的应用。在此基础上,实现对小流域精准化管理,资源高效利用,水土流失科学治理等目标,从而适应流域生态安全和经济发展,并满足流域内居民对美好生活的追求。整个流域在地面通过防蚀道路相连,空中则通过先进的无人机、互联网技术实时相通,实现天地一体化的立体监测系统,为流域经济社会发展和人居环境生态性协调发展提供保证。

(3) 广泛且综合利用绿色技术实现粮果产业的高质量发展。果业是黄土高原沟壑区的优势特色产业。它不但直接决定着当地群众的经济收入和区域高质量发展进程,而且会影响到区域水土流失综合治理的成效和可持续性。未来,在区域高质量发展期,必须依托已有信息技术和产业经营管理经验,在产前布局、产中田间管理、产后的加工与储藏以及销售等全链条开展苹果产业技术集成和支持。其次,要加紧研发和推广粮果绿色施肥技术,提高生物可降解农膜的推广使用,降低农膜污染和粮果土壤的污染。黄土高原沟壑区是我国生态功能区同时也是重要的粮果生产区。在做好生态保护基础上,基于土壤有机质含量低,土壤基础肥力瘠薄的特点,通过加大秸秆还田,逐步实施少耕和免耕,进一步培肥土壤,降低侵蚀。同时针对果园土壤推广自然生草等技术加强高标准

农田和果园建设。再次,基于高塬沟壑区大量果园分布在沟坡地的梯田之上,且地块单元小而分散的特点,研发适宜的田间耕作、运输、采摘等机械,不仅有助于提高生产效率,也能应对未来劳动力短缺的局面。最后,应该加强高塬沟壑区居民生活区、粮果生产区和生态保护区的科学合理布局,把尚居住在沟道里的居民向塬面居民区集中,确保生态环境与人类社会和谐发展,共同繁荣。

未来 10 a,高塬沟壑区塬、坡、沟生态空间布局将进一步优化,生态产业发展进一步加快,绿色智慧小流域建成并统筹使用,人民安居乐业,人与自然和谐共生的生态文明体系建成。在生态保护基础上,着力建设中华文明农耕文化传承区,并从生态休闲(槐花节、苹果花节、苹果采摘节等)角度为周边城镇居民提供高品位绿色空间。至此,黄土高塬沟壑区将呈现出社会、经济和生态环境全面高质量发展的新面貌。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 中华人民共和国国务院. 全国主体功能区规划[B]. 2011:3-89.
- [2] 长武县志编纂委员会. 长武县志[M]. 西安: 陕西人民出版社,2000.
- [3] 李玉山. 黄土高原治理开发之基本经验[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):51-57.
- [4] 国家发展改革委,水利部,农业部,等. 黄土高原综合治理规划大纲(2010-2030)[B]. 2010.
- [5] 水利部. 黄土高塬沟壑区“固沟保塬”综合治理规划(2016—2025) [B]. 2018.
- [6] 刘文兆,党廷辉. 中国生态系统定位观测与研究数据集(农田生态系统卷)[M]. 陕西长武站(1998—2008). 北京: 中国农业出版社,2012.
- [7] 李玉山,苏陕民. 长武王东沟小流域高效生态经济系统综合研究[M]. 科学技术文献出版社,1991:1-27.
- [8] 郝明德. 黄土高塬沟壑区小流域综合治理模式[J]. 水土保持通报,1996,16(1):68-72.
- [9] 刘守赞,张建平,郭胜利. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳分布特征及影响因素[D]. 陕西 杨凌,2005.
- [10] 车升国,郭胜利. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳储量和二氧化碳排放[D]. 陕西 杨凌,2010.
- [11] 郝明德,李军超,党廷辉. 黄土高原沟壑区高产高效农业综合发展研究[J]. 水土保持通报,2002,22(5):5-8.
- [12] 李如剑,王蕊,李娜娜,等. 黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素[J]. 环境科学,2015,36(7):340-346.
- [13] 白岗栓,邹超煜,杜社妮. 渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(3):151-158.
- [14] 杜社妮,白岗栓,郭东峰,等. 渭北旱塬衰弱苹果树更新修剪技术[J]. 北方园艺,2017(15):202-206.
- [15] 陈绍宇,许建民,王文龙,等. 黄土高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径[J]. 水土保持通报,2009,29(4):37-41.
- [16] 孟全省,张建宏. 淳化县泥河沟流域农业经济增长因素分析[J]. 西北林学院学报,2000,15(1):85-88.
- [17] 王志雄,赵安成. 南小河沟水土保持科技示范园建设的实践[J]. 中国水土保持,2011(1):41-42,58.
- [18] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [19] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报,2001,38(3):353-356.
- [20] 黄明斌,杨新民,李玉山. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报,2001,56(1):7-13.
- [21] 樊军,邵明安,郝明德,等. 渭北旱塬苹果园土壤深层干燥化与硝酸盐累积[J]. 应用生态学报,2004(7):1213-1216.
- [22] Zhang Zhiqiang, Li Min, Si Bingcheng, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2018,622:84-593.
- [23] Li Huijie, Si Bingcheng, Wu Pute, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess in monsoonal climate[J]. Hydrological Processes, 2019,33:320-327.
- [24] 曹裕,李军,张社红,等. 黄土高原苹果园深层干燥化特征[J]. 农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [25] 郭正,李军,张玉娇,等. 黄土高原不同降水量区旱作苹果园地水分生产力和土壤干燥化效应模拟与比较[J]. 自然资源学报,2016,31(1):135-150.
- [26] Guo Shengli, Wu Jinshui, Dang Tinghui, et al. Impacts of fertilizer practices on environmental risk of nitrate in semi-arid farmlands in the Loess Plateau of China[J]. Plant and Soil, 2010,330:1-13.
- [27] 樊军,郝明德,党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J]. 生态环境学报,2000,9(1):23-26.
- [28] 郭胜利,郝明德,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤NO<sub>3</sub>-N的积累特征及其影响因素[J]. 自然资源学报,2003,18(1):37-43.
- [29] 彭琳,彭祥林. 黄土地区土壤中磷的含量分布、形态转化与磷肥合理施用[J]. 土壤学报,1989,26(4):344-352.
- [30] 郭胜利,车升国,梁伟,等. 小流域土壤磷的积累特征及其环境效应:以黄土高原沟壑区王东沟小流域为例[J]. 自然资源学报,2009,4(7):1171-1180.
- [31] 杨雨林,郭胜利,马玉红,等. 黄土高原沟壑区不同年限苹果园土壤碳氮磷变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):685-691.